



انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نانوسیال آب-آلومینا در محفظه L شکل مورب

سمانه کریمی^۱، بهزاد قاسمی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* صندوق پستی ۱۱۵، ghasemi@eng.sku.ac.ir

چکیده- در این مقاله، جریان آرام جابه‌جایی آزاد نانوسیال آب و آلومینا در یک محفظه L شکل مورب به روش عددی بررسی شده است. دو دیواره محفظه در دمای گرم، دو دیواره مقابل آنها در دمای سرد و دو دیواره دیگر عایق است. معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی به روش حجم کنترل جبری شده و به کمک الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. اثر تغییرات عدد ریلی، درصد حجمی نانوذرات، نسبت ابعادی محفظه و زاویه محفظه بر جریان و نرخ انتقال حرارت محفظه بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که افزایش پنج درصد حجمی نانوذرات به آب خالص می‌تواند تا بیست درصد موجب افزایش انتقال حرارت شود. همچنین، نرخ انتقال حرارت محفظه با نسبت ابعادی محفظه نسبت عکس داشته و اثر تغییر زاویه محفظه بر نرخ انتقال حرارت در اعداد ریلی بالا بیشتر از اعداد ریلی پایین است.

واژگان کلیدی: جابه‌جایی آزاد، نانوسیال، محفظه L شکل، عدد ریلی

Water-Alumina natural convection heat transfer in an inclined L shape cavity

S.Karimi¹, B.Ghasemi^{2*}

1-MSc. Student, Mech. Eng., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran

* P. O. B. 115 Shahrekord, ghasemi@eng.sku.ac.ir

Abstract- A numerical investigation of water-alumina natural convection laminar flow in an inclined L shape cavity is performed. Two wall of the cavity are hot with the temperature of T_h , two walls are cold with the temperature of T_c , and two other walls are thermally adiabatic. The two dimensional continuity, momentums and energy equations are solved numerically with a finite volume approach using the well known SIMPLE algorithm. The influence of pertinent parameters such as Rayleigh number, Ra , solid volume fraction, ϕ , inclination angle, θ , and cavity aspect ratio, A , on the fluid flow, fluid temperature and cavity heat transfer characteristics is studied. The results indicate that nanofluid with higher nanoparticles has better performance. The results also show that the inclination angle has a significant effect on the heat transfer performance at high Rayleigh numbers.

Keywords: Natural Convection, Nanofluid, L Shape Cavity, Rayleigh Number

۱- مقدمه

انتقال حرارت در محفظه‌های بسته L شکل، کاربردهای متنوعی در صنعت دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به کاربرد در ماشین‌های الکتریکی، سیستم‌های کابل زیرزمینی و خنک‌کاری وسایل میکروالکترونیک اشاره کرد. امروزه با کوچک شدن تجهیزات الکترونیکی لزوم استفاده بهینه از فضا اهمیت خاصی پیدا کرده است. لذا در طراحی این تجهیزات استفاده از محفظه‌های با مقاطع مختلف همچون محفظه L شکل می‌تواند مفید واقع شود. با توجه به این کاربردها، محققان متعددی به بررسی جریان و انتقال حرارت در این نوع محفظه‌ها پرداخته‌اند، که در اینجا به مواردی اشاره می‌شود. انگرازا و ماهاجان [۱] به مطالعه و بررسی جریان جابجایی آزاد سیال هوا و انتقال حرارت ناشی از آن در محفظه L شکل پرداختند. ایشان اثر پارامترهایی همچون فضای داخلی، نسبت ابعاد محفظه (ارتفاع محفظه به طول آن) و عدد ریلی بر روی نرخ انتقال حرارت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داده است که تغییر عدد ریلی تاثیر مستقیم بر نرخ انتقال حرارت داشته و افزایش عدد ریلی موجب بهبود انتقال حرارت محفظه می‌گردد. این در حالی است که نتایج آنها نشان می‌دهد که نسبت ابعاد محفظه بر نرخ انتقال حرارت اثر معکوس دارد. تسنیم و محمود [۲] به بررسی عددی جریان جابجایی آزاد در یک محفظه L شکل مورب پرداختند. نتایج این مطالعات نشان داده است که میزان انتقال حرارت برای محدوده مشخصی از اعداد ریلی با تغییرات زاویه ثابت بوده و اثر نسبت ابعاد محفظه بر روی نرخ انتقال حرارت معکوس می‌باشد.

در انتقال حرارت جابجایی اساسی‌ترین نقش بر عهده سیال می‌باشد. سیالاتی همچون آب، روغن و اتیلن گلیکول سیالاتی هستند که نقش مهمی را در انتقال حرارت ایفا می‌کردند. این نوع سیالات دارای ضریب هدایت نسبتاً پایینی می‌باشند و پاسخگوی انتظارات تکنولوژی مدرن نیستند. گروهی جدید از سیالات که قادر به انتقال حرارت می‌باشند، نانوسیال نامیده می‌شوند. نانوسیالات به وسیله پخش و منتشر کردن ذرات در اندازه‌های نانومتری (۱-۱۰۰ nm) در سیالات متداول منتقل کننده گرما، به منظور افزایش هدایت گرمایی و بهبود عملکرد انتقال حرارت، ساخته می‌شوند. افزودن این ذرات که عموماً دارای ضرائب انتقال حرارت بالایی هستند

باعث می‌شود که ضریب هدایت نانوسیال ایجاد شده به مراتب بالاتر از سیال خالص باشد [۳، ۴]. به همین دلیل، طی سال‌های اخیر توجه محققان به بررسی مسایل انتقال حرارت این سیالات معطوف شده است. در این میان مسایل جابجایی نانوسیال در محفظه‌ها نیز مورد توجه بوده و تحقیقات زیادی نیز در این زمینه به چشم می‌خورد.

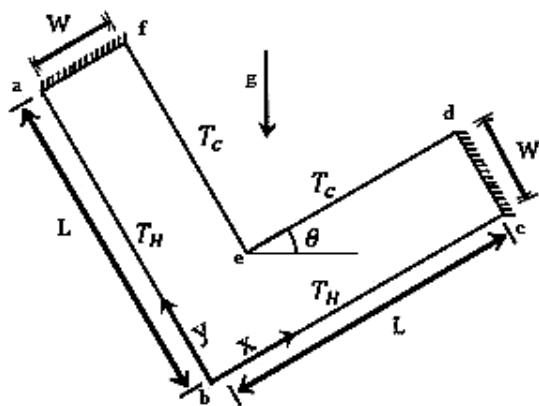
محمودی و همکاران [۵] به حل عددی جریان جابجایی آزاد نانوسیال آب-مس در یک محفظه مربعی شامل یک منبع حرارتی افقی روی یک ضلع عمودی محفظه پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که به ازای طول منبع حرارتی و عدد ریلی مشخص، عدد نوسلت متوسط بطور خطی با درصد حجمی نانوذرات تغییر کرده و با افزایش این پارامتر نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. خانافر و همکاران [۶] به حل عددی جریان جابجایی آزاد یک نانوسیال داخل یک محفظه مربع شکل پرداختند. ایشان با بررسی اثر افزودن نانوذرات به سیال خالص به این نتیجه رسیدند که هرچه درصد حجمی نانوذرات بیشتر شود نرخ انتقال حرارت محفظه بیشتر می‌شود. موتامیلسلوان و همکاران [۷] جریان جابجایی آزاد نانوسیال آب-مس در یک محفظه با درپوش متحرک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعات نشان داد پارامترهایی همچون نسبت ابعاد محفظه و درصد حجمی ذرات بر روی میدان جریان و نرخ انتقال حرارت از محفظه مؤثرند. همچنین نتایج آنها نشان داد که در شرایط ثابت، عدد نوسلت متوسط با درصد حجمی ذرات تقریباً به صورت خطی تغییر می‌کند.

قاسمی و امین‌الساداتی [۸] به مطالعه عددی جریان جابجایی آزاد، در یک محفظه مثلثی شکل، با منبع حرارتی بر روی دیواره عمودی، حاوی نانوسیال آب-مس اکسید پرداختند. آنان اثر پارامترهایی همچون عدد ریلی، نسبت ابعاد محفظه، درصد حجمی نانوذرات، محل منبع حرارتی و حرکت براونی نانوذرات را بر روی میدان‌های جریان و دما مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که اگر حرکت براونی نانوذرات در نظر گرفته شود، در اعداد ریلی پایین با افزایش درصد حجمی ذرات نرخ انتقال حرارت بطور پیوسته افزایش می‌یابد. در حالی که در اعداد ریلی بالا حداکثر نرخ انتقال حرارت در یک مقدار مشخصی از درصد حجمی ذرات رخ می‌دهد. از سوی دیگر، اگر از حرکت براونی نانوذرات صرف نظر شود، به ازای همه مقادیر

در این مقاله، علاوه بر بررسی اثر پارامترهایی همچون عدد ریلی، درصد حجمی نانوذرات و نسبت ابعادی محفظه، اثر زاویه محفظه نیز بر جریان و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است.

۲- بیان مسئله

محفظة مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. عرض و ارتفاع محفظه هر دو برابر با L و ضخامت آن W است. نسبت ابعاد محفظه به صورت $A=W/L$ ، نسبت ضخامت به عرض محفظه تعریف می‌شود. محفظه حاوی نانوسیال آب-آلومینا بوده و با امتداد افق زاویه θ می‌سازد. دو دیواره محفظه در دمای گرم T_h ، دو دیواره مقابل آنها در دمای سرد T_c و دو دیواره دیگر عایق است. شتاب گرانشی g ، در امتداد قائم اعمال می‌شود. فرض شده که در تمام دیواره‌ها شرط عدم لغزش برقرار است. هدف این است که اثر پارامترهایی مختلف بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال بررسی شود.



شکل ۱ تصویر محفظه L شکل

۳- معادلات حاکم بر جریان نانوسیال

در این بررسی نانوسیال را به عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و نانوذرات جامد در نظر می‌گیریم. با صرف‌نظر از تلفات حرارتی لزجت و فرض سیال نیوتنی غیرقابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسک معادلات بدون بعد حاکم برای جریان آرام دوبعدی داخل محفظه عبارت‌اند از:

پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

اعداد ریلی، با افزایش درصد حجمی ذرات نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. امین‌الساداتی و قاسمی [۹] در پژوهشی دیگر جریان جابه‌جایی آزاد نانوسیال در یک محفظه مربعی با یک منبع حرارتی روی ضلع پایینی محفظه را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که افزودن نانوذرات به آب خالص در اعداد ریلی پایین، موجب افزایش قابل توجهی در انتقال حرارت آن می‌شود. همچنین نوع نانوذرات، طول و موقعیت منبع حرارتی اثر مهمی بر دمای ماکزیمم منبع حرارتی دارند. در کار مشابهی شیخزاده و همکاران [۱۰] به بررسی جریان جابه‌جایی آزاد نانوسیال آب-مس داخل یک محفظه مربعی پرداختند. آنها با تغییر مکان منبع حرارتی روی اضلاع محفظه به بررسی اثر جابه‌جایی منبع حرارتی روی اضلاع محفظه پرداختند. آنها با بررسی اثر افزایش عدد ریلی و همچنین تعداد ذرات نانو به این نتیجه رسیدند که نرخ انتقال حرارت از دیواره در اعداد ریلی بالاتر بیشتر بوده و همچنین افزایش تعداد ذرات نانو موجب افزایش نرخ انتقال حرارت روی دیواره می‌شود.

اخیرا محمودی [۱۱] به شبیه‌سازی عددی جریان جابه‌جایی آزاد نانوسیال آب-مس در یک محفظه L شکل پرداخته است. او پس از رسم خطوط جریان و همدمای و محاسبه عدد نوسلت متوسط روی دیواره، به این نتیجه رسیده است که افزایش قدرت جابه‌جایی و همچنین تعداد ذرات نانو موجب افزایش نرخ انتقال حرارت از دیواره می‌شود. همچنین او با بررسی اثر تغییر نسبت ابعاد محفظه به این نتیجه رسید که با افزایش نسبت ابعاد محفظه نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

با توجه به تحقیقات انجام‌شده مشاهده می‌شود که علی‌رغم بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد هوا در محفظه‌های L شکل، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نانوسیال در این نوع محفظه‌ها، کمتر بررسی شده است. به همین منظور، در این مقاله، به مطالعه عددی انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در یک محفظه L شکل مورب حاوی نانو سیال آب-آلومینا (Al_2O_3) پرداخته شده است. اگر چه اخیرا محمودی [۱۰] انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب-مس در محفظه L شکل را بررسی کرده است، لیکن در این بررسی محفظه عمودی بوده و اثرات زاویه محفظه در آن مد نظر قرار نگرفته است. این در حالی است که زاویه محفظه می‌تواند تاثیر بسزایی در نیروهای غوطه‌وری و در نتیجه انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد داشته باشد. به همین دلیل،

مونتوم X:

در مورد ویسکوزیته نانوسیال نیز می‌توان از رابطه بریکمن

[۱۲] استفاده نمود:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (10)$$

روابط مختلفی برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه

شده که در اینجا از فرمول ماکسول [۱۳] استفاده شده است:

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_s)}{(k_s + 2k_f) + \phi(k_f - k_s)} \right] \quad (11)$$

۴- شرایط مرزی و عدد نوسلت

شرایط مرزی سرعت، شامل شرط عدم لغزش برای کلیه دیواره‌ها

و شرایط مرزی حرارتی $T = T_h$ برای دیواره‌های گرم، $T = T_c$ برای دیواره‌های سرد و $\partial T / \partial x = 0$ یا $\partial T / \partial y = 0$ برای

دیواره‌های عایق است. بنابراین با استفاده از پارامترهای بی‌بعد

ارائه‌شده در رابطه (۵) شرایط مرزی بدون بعد عبارت‌اند از:

$$U = V = 0, \quad \theta^* = 1 \quad \text{روی دیواره‌های گرم}$$

$$U = V = 0, \quad \theta^* = 0 \quad \text{روی دیواره‌های سرد}$$

دیواره‌های عایق:

$$U = V = 0, \quad \partial \theta^* / \partial X = 0 \quad \text{or} \quad \partial \theta^* / \partial Y = 0$$

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است. با

توجه به مقادیر بدون بعد، نوسلت موضعی روی دیواره‌های گرم

محفظه عبارت است از:

$$\text{Nu}(X) = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta^*}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad \text{روی دیواره در جهت X}$$

$$\text{Nu}(Y) = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta^*}{\partial X} \right)_{X=0} \quad \text{روی دیواره در جهت Y}$$

نوسلت متوسط روی دیواره‌های گرم محفظه از انتگرالگیری

نوسلت موضعی روی این دیواره به دست می‌آید:

$$\text{Nu} = -\frac{1}{2} \frac{k_{nf}}{k_f} \left(\int_0^1 \left(\frac{\partial \theta^*}{\partial X} \right)_{X=0} dY + \int_0^1 \left(\frac{\partial \theta^*}{\partial Y} \right)_{Y=0} dX \right) \quad (12)$$

۵- روش عددی

جهت گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان، یعنی معادلات

(۱) الی (۴)، از روش حجم کنترل استفاده شده است. بدین

منظور دامنه حل به شبکه‌های متعامد تقسیم شده و معادلات

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \text{Ra Pr } \theta^* \sin \theta \quad (2)$$

مونتوم Y:

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \text{Ra Pr } \theta^* \cos \theta \quad (3)$$

انرژی:

$$U \frac{\partial \theta^*}{\partial X} + V \frac{\partial \theta^*}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta^*}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

متغیرهای بی‌بعد استفاده شده در این معادلات عبارت‌اند از:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vL}{\alpha_f}, \quad P = \frac{\bar{p}L^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2}$$

$$\theta^* = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad \text{Ra} = \frac{g \beta_f L^3 (T_h - T_c)}{\nu_f \alpha_f}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (5)$$

برای حل این معادلات نیاز به خواص ترموفیزیکی نانوسیال

است. چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی و ضریب

پخش حرارتی نانوسیال به کمک خواص سیال و نانوذرات از

روابط زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (6)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (7)$$

$$(\rho c p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c p)_f + \phi(\rho c p)_s \quad (8)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho c p)_{nf} \quad (9)$$

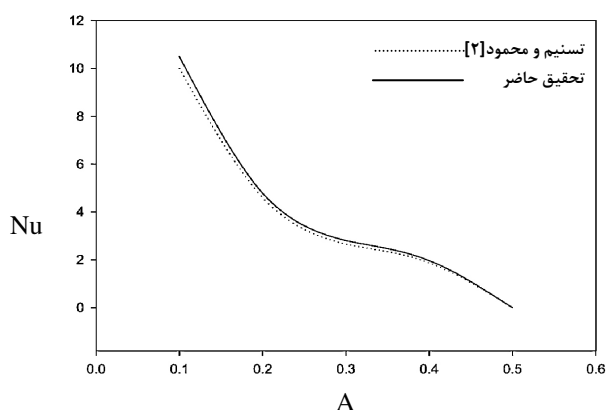
زیرنویس‌های nf ، f و s به ترتیب اشاره به خواص نانوسیال،

آب و نانوذرات آلومینا دارد. خواص آب و ذرات آلومینا در

جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات آلومینا [۱۴]

| خواص | آب خالص | نانو ذرات آلومینا (Al_2O_3) |
|--|---------|---|
| ρ (kg m^{-3}) | ۹۹۷/۱ | ۳۹۷۰ |
| C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) | ۴۱۷۹ | ۷۵۶ |
| k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) | ۰/۶۱۳ | ۴۰ |
| β (K^{-1}) | ۰/۰۰۰۲۱ | ۰/۰۰۰۰۰۸۵ |



شکل ۲ مقایسه نوسلت متوسط محفظه L شکل با سیال هوا با نتایج موجود در مرجع [۲]

در مقایسه دیگر، عملکرد برنامه حاضر در مسایل نانوسیال کنترل شده است. در این بررسی محفظه مربعی به طول L در نظر گرفته شده است که یک منبع حرارتی به طول $L/2$ با دمای گرم T_h وسط یکی از اضلاع عمودی آن قرار گرفته و ضلع عمودی دیگر آن در دمای سرد T_c قرار دارد. سایر اضلاع این محفظه عایق می‌باشد. محفظه حاوی نانوسیال آب و مس است. عدد نوسلت متوسط روی منبع حرارتی گرم برحسب درصد حجمی نانوذرات در اعداد ریلی 10^3 و 10^4 در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب رسم شده است. با توجه به این دو نمودار دیده می‌شود که اختلاف نتایج کار حاضر و مراجع [۹] و [۱۶] در حد قابل قبول است.

۷- نتایج

پس از اطمینان از عملکرد برنامه لازم است که استقلال جواب‌ها از تعداد نقاط شبکه بررسی شده و شبکه حل مناسب انتخاب شود. بدین منظور بررسی بر روی اثر تعداد نقاط شبکه بر پارامترهای جریان و دما انجام گرفته است. به عنوان نمونه در جدول ۲ عدد نوسلت متوسط روی دیواره‌های گرم در شبکه‌بندی‌های مختلف آورده شده است. این جدول برای مقادیر مشخص $A = W/L = 0.5$, $\phi = 0.03$, $\theta = 45^\circ$ و اعداد ریلی مختلف تهیه شده است. با توجه به این جدول، مشخص است که برای شبکه‌های ریزتر از 80×80 نتایج تا چهار رقم اعشار برابر می‌باشند. بدین ترتیب شبکه یکنواخت 80×80 برای اجراهای برنامه انتخاب شده است.

فوق بر روی آنها انتگرال‌گیری می‌شود. برای راحتی محاسبه دبی‌ها روی وجوه حجم کنترل و اعمال آسان‌تر مقادیر فشارها، معادلات مومنتوم بر روی شبکه‌های جابه‌جاشده انتگرال‌گیری شده‌اند. معادلات جبری به‌دست آمده به کمک الگوریتم سیمپل به طور همزمان حل شده‌اند. جزئیات بیشتر روش حل در مرجع [۱۵] آمده است. جهت اجرای این الگوریتم برنامه‌ای به زبان فرترن نوشته شده است. در این برنامه از روش خط‌به‌خط و حل ماتریس سه‌قطری برای حل دستگاه معادلات جبری کمک گرفته شده است. با توجه به طبیعت تکرار روش حل از معیار همگرایی زیر استفاده شده است:

$$\sum_j \sum_i \left| \frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\varphi^{n+1}} \right|_{i,j} \leq 10^{-7} \quad (13)$$

که n تعداد تکرار و φ هریک از متغیرهای وابسته سرعت‌ها و یا دماست.

گفتنی است که برای ایجاد محفظه L شکل ابتدا دامنه حل را به صورت مربع کامل در نظر گرفته، آن را شبکه‌بندی کرده و شرایط مرزی را روی مرزهای آن اعمال می‌کنیم. برای راحتی از شبکه‌های یکنواخت با فاصله مساوی نقاط شبکه در کل دامنه حل استفاده شده است. سپس شبکه‌هایی را که خارج از دامنه واقعی مسئله قرار می‌گیرند غیرفعال کرده تا محفظه L شکل با شرایط مرزی مورد نظر ایجاد شود. این امر به کمک اعمال مقادیر ضرایب لزجت و هدایت بی‌نهایت به این شبکه‌ها انجام شده است.

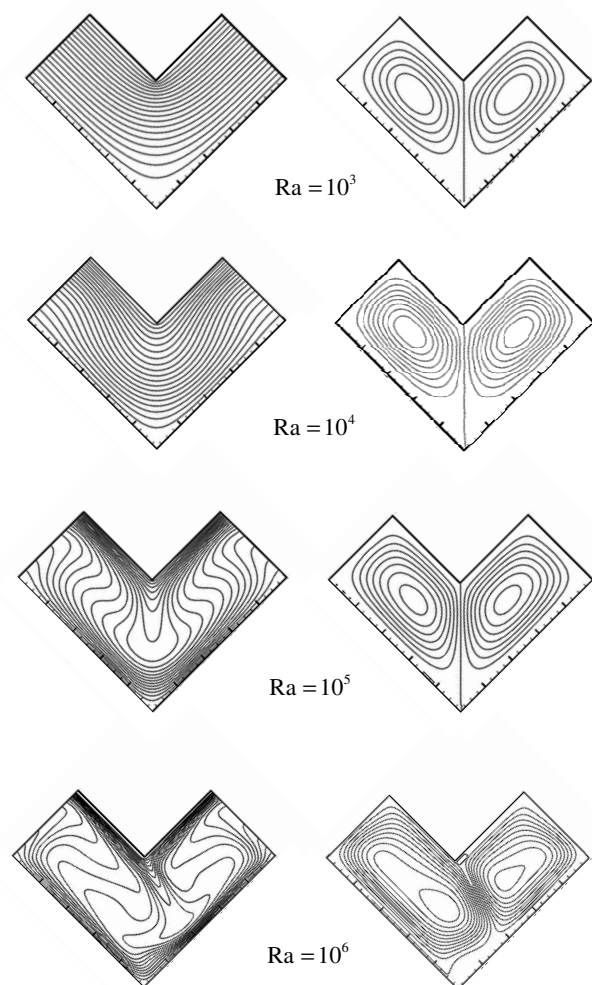
۶- کنترل عملکرد برنامه

جهت بررسی صحت عملکرد برنامه نوشته‌شده مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش‌های دیگران صورت گرفته است. در مرجع [۲] جابه‌جایی آزاد سیال خالص هوا در محفظه L شکلی مشابه با هندسه حاضر بررسی شده است. دو دیواره از این محفظه در دمای ثابت T_h ، دو دیواره در دمای ثابت T_c و دیواره‌های دیگر محفظه عایق هستند.

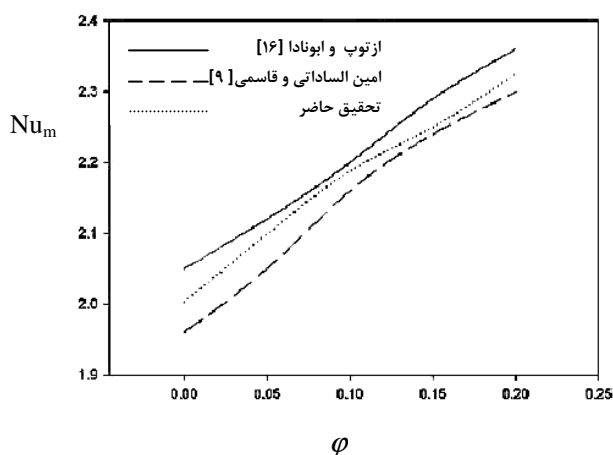
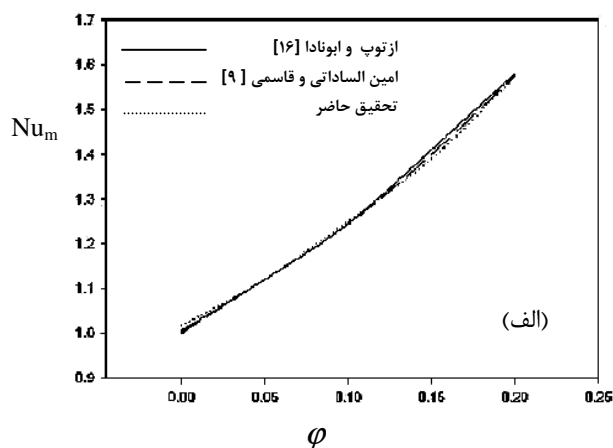
در شکل ۲ عدد نوسلت متوسط روی دیواره گرم این محفظه برحسب نسبت ابعاد محفظه، A ، در حالت $Ra = 10^4$ و $\theta = 0$ رسم شده است. اختلاف ناچیز نتایج کار حاضر و مرجع فوق مشاهده می‌شود.

وجود اختلاف دمای دیواره‌ها و در نتیجه نیروهای غوطه‌وری بوجود می‌آیند. با افزایش عدد ریلی به 10^6 ، برخلاف شرایط مرزی و هندسه متقارن مسئله، تقارن خطوط همدمای و میدان جریان بر هم خورده است. مشابه این رفتار در بررسی وارول و همکارانش [۱۷] در مطالعه جابه‌جایی آزاد در هندسه متقارن مثلی نیز گزارش شده است و می‌تواند نشانه‌ای از ناپایداری شدن جریان با افزایش ریلی باشد.

در اعداد ریلی 10^3 و 10^4 ، خطوط همدمای به صورت خطوطی موازی با دیواره‌های محفظه‌اند. فرم خطوط همدمای در این شرایط نشان می‌دهد که انتقال حرارت هدایت، در اعداد ریلی پایین، انتقال حرارت غالب می‌باشد. آشفتگی خطوط همدمای در اعداد ریلی بالاتر نشان از غالب شدن انتقال حرارت جابه‌جایی بر انتقال حرارت هدایتی دارد.



شکل ۴ خطوط جریان (راست) و همدمای (چپ) در اعداد ریلی مختلف ($\theta = 45^\circ$, $\phi = 0.03$, $A = W/L = 0.5$)



شکل ۳ مقایسه نوسلت متوسط محفظه مربعی حاوی نانوسیال با دیگر مراجع (الف) $Ra = 10^3$ (ب) $Ra = 10^4$

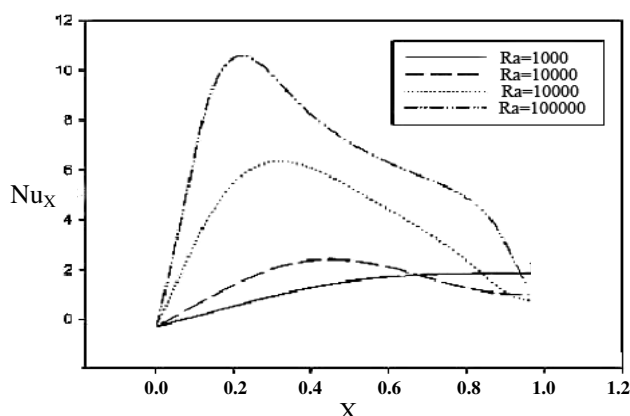
جدول ۲ تاثیر تعداد نقاط شبکه بر نوسلت متوسط

$$\theta = 45^\circ, \phi = 0.03, A = W/L = 0.5$$

| تعداد شبکه | ۱۰۰×۱۰۰ | ۸۰×۸۰ | ۶۰×۶۰ | ۴۰×۴۰ | ۲۰×۲۰ |
|-------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| $Ra = 10^3$ | ۱/۴۶۵۴ | ۱/۴۶۵۴ | ۱/۴۶۵۸ | ۱/۴۸۹۶ | ۱/۶۱۶۹ |
| $Ra = 10^4$ | ۱/۷۶۳۳ | ۱/۷۶۳۳ | ۱/۷۶۴۲ | ۱/۷۷۵۲ | ۱/۸۶۵۳ |
| $Ra = 10^5$ | ۴/۰۶۳۴ | ۴/۰۶۳۴ | ۴/۰۶۷۳ | ۴/۰۴۲۸ | ۳/۹۰۳۴ |
| $Ra = 10^6$ | ۶/۹۹۴۸ | ۶/۹۹۴۸ | ۶/۹۹۶۹ | ۶/۷۲۴۰ | ۶/۴۸۷۰ |

۷-۱- بررسی اثر عدد ریلی

به منظور بررسی اثر قدرت جابه‌جایی، خطوط جریان و همدمای برای شرایط $\theta = 45^\circ$, $\phi = 0.03$, $A = W/L = 0.5$ در اعداد ریلی مختلف، در شکل ۴ با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل مشاهده می‌کنیم که میدان جریان برای اعداد ریلی 10^3 تا 10^5 به صورت گردابه‌های متقارن است. این گردابه‌ها به دلیل



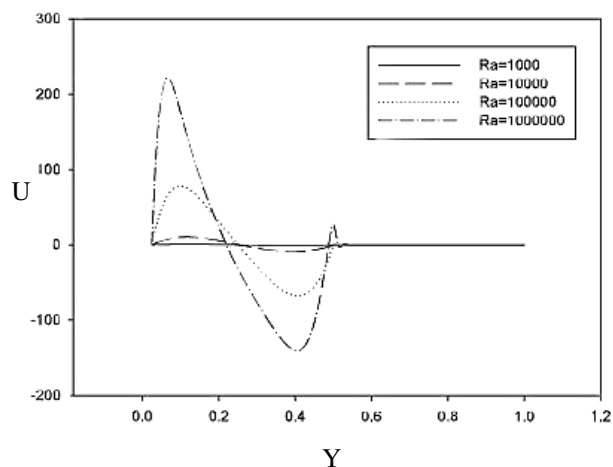
شکل ۶ تغییرات نوسلت موضعی به ازای اعداد ریلی مختلف
($\theta = 45^\circ$, $\phi = 0.03$, $A = W/L = 0.5$)

با توجه به تقارن مسئله در اعداد ریلی 10^3 تا 10^5 منحنی تغییرات عدد نوسلت موضعی روی دیواره گرم واقع بر محور Y نیز به همین ترتیب است. در عدد ریلی 10^6 ، به علت برهم خوردن تقارن، تغییرات عدد نوسلت موضعی روی این دیواره کمی متفاوت است.

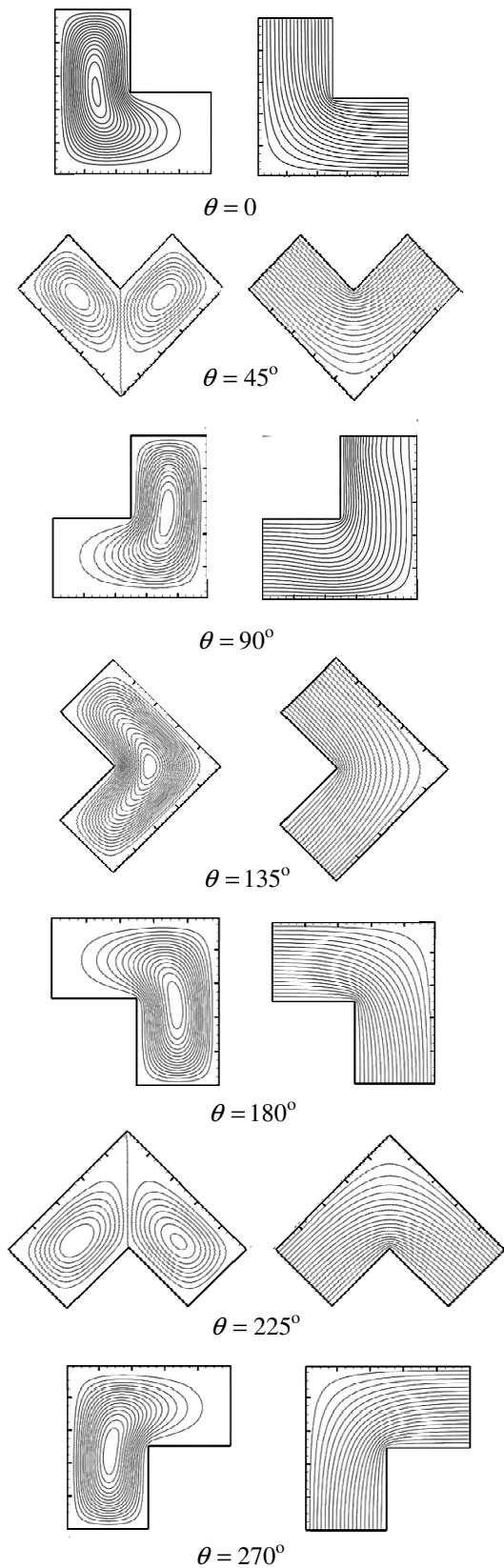
۷-۲- بررسی اثر افزایش درصد حجمی نانوذرات

به منظور بررسی اثر تغییر درصد حجمی نانوذرات رفتار جریان در $\theta = 45^\circ$, $A = W/L = 0.5$ برای اعداد ریلی مختلف، با تغییر ϕ در فاصله $0 \leq \phi \leq 0.05$ مورد مطالعه قرار گرفته است. تغییرات نوسلت موضعی روی یک دیواره گرم برای درصدهای حجمی مختلف نانوذرات به ازای $Ra = 10^4$ در شکل ۷ رسم شده است. مقایسه منحنی‌های این شکل نشان می‌دهد که در ناحیه ابتدایی و میانی دیواره گرم بیشترین مقدار نوسلت مربوط به سیال خالص می‌باشد. این در حالی است که در ناحیه انتهایی دیواره گرم، رفتار منحنی‌ها برعکس می‌شود. با توجه به رابطه لزجت نانوسیال، با افزایش ذرات نانو، لزجت اضافه شده و سرعت در نانوسیال کاهش می‌یابد. در نواحی ابتدایی و میانی دیواره، بالا بودن سرعت سیال خالص، انتقال حرارت بیشتری را نتیجه می‌دهد. از سوی دیگر در نواحی انتهایی دیواره سرعت‌ها کم شده و تاثیرپذیری انتقال حرارت از ضریب هدایت بیشتر می‌شود. افزایش درصد حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت نانوسیال و در نتیجه نرخ انتقال حرارت می‌شود. با توجه به اختلاف قابل توجه نمودارها در این قسمت انتظار می‌رود عدد نوسلت متوسط با افزایش درصد حجمی افزایش یابد.

برای بررسی بهتر خطوط جریان رسم‌شده در شکل ۴، پروفیل مولفه U سرعت در مقطع $X = 0.5$ برای اعداد ریلی مختلف در شکل ۵ آمده است. این پروفیل‌های سرعت، جهت چرخش جریان داخل محفظه را نشان می‌دهد. در نزدیک دیواره‌های گرم جریان به سمت بالا حرکت کرده و در مجاورت دیواره‌های سرد حرکت سیال رو به پایین خواهد بود. به این صورت گردابه‌های ساعتگرد و پادساعتگرد جریان به ترتیب در نیمه سمت چپ و نیمه سمت راست محفظه بوجود می‌آید. مقایسه پروفیل‌های سرعت در اعداد ریلی مختلف نشان می‌دهد که با افزایش عدد ریلی و تقویت نیروهای غوطه‌وری اندازه سرعتافزایش می‌یابد. گفتنی است که گردابه‌های کوچک ایجاد شده به دلیل جابجایی بالا در $Ra = 10^6$ ، موجب تغییر جهت سرعت جریان در نزدیکی $Y = 0.5$ در نمودار سرعت شده است. تغییرات عدد نوسلت موضعی روی دیواره گرم واقع بر محور X برای اعداد ریلی مختلف در شکل ۶ آمده است. در $X = 0$ ، به دلیل بی‌حرکت بودن جریان در گوشه محفظه، انتقال حرارت ناچیز است. با فاصله گرفتن از گوشه محفظه نرخ انتقال حرارت افزایش یافته است. در $Ra = 10^3$ که مکانیزم انتقال حرارت هدایتی حاکم است همواره با دور شدن از مبدا مختصات نرخ انتقال حرارت اضافه می‌شود. با زیاد شدن عدد ریلی جریان‌های جابجایی آزاد تقویت شده و عدد نوسلت موضعی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. هر چه عدد ریلی بیشتر شود، قدرت گردابه‌های چرخشی بیشتر شده و تغییرات نرخ انتقال حرارت موضعی بیشتر است.

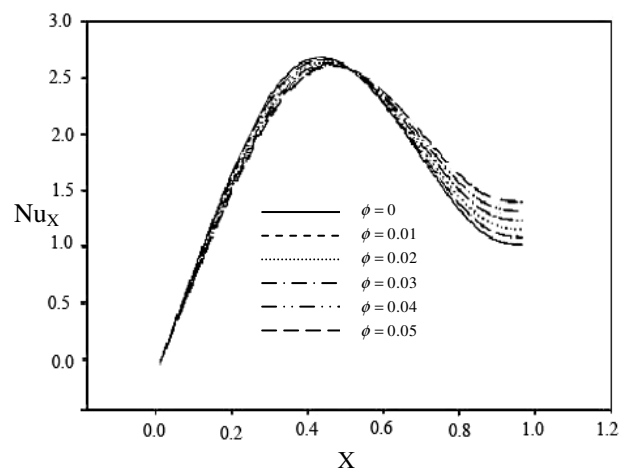


شکل ۵ پروفیل سرعت در جهت X در $X = 0.5$ به ازای اعداد ریلی مختلف ($\theta = 45^\circ$, $\phi = 0.03$, $A = W/L = 0.5$)



شکل ۸ خطوط جریان (چپ) و همدم (راست) در زاویه‌های مختلف محفظه ($Ra = 10^4$, $\phi = 0.03$, $A = 0.5$)

این مقایسه در جدول ۳ برای اعداد ریلی مختلف آورده شده است. در این جدول عدد نوسلت متوسط و درصد افزایش عدد نوسلت متوسط نانوسیال نسبت به سیال خالص یعنی $\%Nu = ((Nu_{nf} - Nu_f) / Nu_f) \times 100$ دیده می‌شود. همان‌طور که از اعداد این جدول دیده می‌شود، با افزایش درصد حجمی نانوذرات عدد نوسلت متوسط افزایش یافته است. این افزایش در اعداد ریلی پایین که مکانیزم هدایت کاملاً حاکم است و در اعداد ریلی بالا که مکانیزم جابه‌جایی کاملاً حاکم است چشمگیرتر است.



شکل ۷ تغییرات نوسلت موضعی به ازای درصد‌های حجمی مختلف نانوذرات ($\theta = 45^\circ$, $Ra = 10^4$, $A = W/L = 0.5$)

جدول ۳ عدد نوسلت متوسط و درصد افزایش آن برای درصد حجمی‌ها و اعداد ریلی مختلف ($\theta = 45^\circ$, $A = 0.5$)

| ϕ | ۰/۰۵ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱ | ۰/۰ | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| Nu | ۱/۵۴۸ | ۱/۴۵۶ | ۱/۳۸۶ | ۱/۳۴۷ | $Ra = 10^3$ |
| %Nu | ۱۴/۹۲ | ۸/۰۹ | ۲/۸۹ | ۰ | |
| Nu | ۱/۷۹۰ | ۱/۷۶۳ | ۱/۷۴۵ | ۱/۷۳۹ | $Ra = 10^4$ |
| %Nu | ۲/۹۳ | ۱/۳۸ | ۰/۳۴ | ۰ | |
| Nu | ۳/۳۵۸ | ۳/۳۲۵ | ۳/۳۱۴ | ۳/۲۶۸ | $Ra = 10^5$ |
| %Nu | ۲/۷۵ | ۱/۷۵ | ۱/۴۰ | ۰ | |
| Nu | ۷/۲۹۸ | ۶/۹۹۵ | ۶/۴۹۷ | ۶/۰۸۵ | $Ra = 10^6$ |
| %Nu | ۱۹/۹۳ | ۱۴/۹۵ | ۶/۷۷ | ۰ | |

۳-۷- بررسی اثر زاویه محفظه

خطوط جریان و همدم برای زوایای $0 \leq \theta \leq 270^\circ$ به ازای $Ra = 10^4$, $\phi = 0.03$, $A = 0.5$ در شکل ۸ آمده است.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در کلیه زاویه‌های مورد بررسی خطوط همدمای موازی با دیواره‌های محفظه بوده و در این حالت، تغییر زاویه اثری چندانی بر خطوط همدمای ندارد. در زاویه‌های $\theta = 0, 90, 180, 270^\circ$ گردابه‌های جریان بیشتر در قسمت عمودی محفظه بوجود آمده‌اند. این در حالی است که در زاویه‌های $\theta = 45, 135, 225^\circ$ میدان جریان به صورت متقارن است. چگونگی توزیع نیروهای بویانسی در جهت‌های X و Y می‌تواند موجب بوجود آمدن این تغییرات در میدان جریان شود.

در زاویه $\theta = 0$ به دلیل اختلاف دمایی دیواره‌های ab و ef (شکل ۱)، یک جریان گردابه‌ای در قسمت عمودی محفظه بوجود می‌آید. این گردابه‌ها تا حدودی به قسمت افقی محفظه نیز نفوذ می‌کند. این در حالی است که در انتهای قسمت افقی محفظه، سیال راکد است. در حالتی که محفظه در زاویه $\theta = 45^\circ$ قرار گرفته است، دو گردابه متقارن، ناشی از اختلاف دمایی abc (دیواره‌های گرم) و def (دیواره‌های سرد) بوجود می‌آید. این حالت ناپایدارترین حالتی است که برای محفظه رخ می‌دهد. در مقابل پایدارترین حالت برای جریان در حالتی است که دیواره گرم در بالا و دیواره سرد در پایین قرار گرفته باشد. به عبارتی $\theta = 225^\circ$ زاویه‌ای است که پایدارترین حالت برای جریان داخل محفظه صورت می‌گیرد. در $\theta = 135^\circ$ گردابه‌هایی شبیه هندسه محفظه با هسته‌های بیضی‌شکل ایجاد می‌شود. در حالتی که محفظه در زاویه $\theta = 180^\circ$ قرار گرفته باشد، به دلیل موقعیت دیواره‌های سرد و گرم (دیواره سرد پایین‌تر از دیواره گرم) هیچ مانعی جهت جلوگیری از نفوذ جریان در قسمت افقی محفظه وجود نداشته و همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، گردابه‌های قسمت عمودی محفظه بیشتر به قسمت افقی محفظه کشیده می‌شوند. در $\theta = 270^\circ$ نیز حالتی مشابه $\theta = 180^\circ$ بوجود می‌آید.

مقادیر نوسلت متوسط روی دیواره گرم در امتداد محور X (Nu_{mx})، نوسلت متوسط روی دیواره گرم در امتداد محور Y (Nu_{my}) و نوسلت متوسط روی دیواره‌های گرم (Nu) در زاویه‌های مختلف در جدول ۴ آمده است. با مقایسه نوسلت متوسط روی دیواره‌های گرم محفظه، مشاهده می‌کنیم که اثر زاویه محفظه در اعداد ریلی بالا بیشتر از اعداد ریلی پایین است. تغییر زاویه بر نیروهای بویانسی و نحوه توزیع این نیروها

مؤثر است. به عبارتی در اعداد ریلی بالاتر که نیروهای بویانسی قوی‌تر است، تاثیر زاویه محفظه بر میزان انتقال حرارت بیشتر است. همان‌طور که از اعداد این جدول مشاهده می‌شود، در زاویه‌های $\theta = 45, 225^\circ$ ، به دلیل تقارن شرایط مرزی سرعت و حرارت، نوسلت متوسط روی دیواره‌های گرم در جهت X و Y با یکدیگر مساوی‌اند. در زاویه‌های $\theta = 0, 180, 270^\circ$ نوسلت متوسط روی دیواره در جهت Y بیشتر از دیواره گرم در جهت X است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌کنیم، در این زاویه گردابه‌های جریان در امتداد محور Y بوجود می‌آید و در امتداد محور X نانوسیال تقریباً ساکن است. به همین دلیل در این زاویه نرخ انتقال حرارت از دیواره در جهت Y بیشتر است. این قضیه در زاویه $\theta = 90^\circ$ ، به دلیل اینکه گردابه‌های جریان در امتداد محور X بوجود می‌آیند، در جهت عکس رخ می‌دهد. در زاویه $\theta = 135^\circ$ گردابه‌های جریان به صورت متقارن بوده، ولی به دلیل موقعیت قرارگیری دیواره گرم در جهت Y (دیواره گرم در پایین و دیواره سرد در بالا)، امکان انتقال حرارت از دیواره در جهت Y بیشتر است.

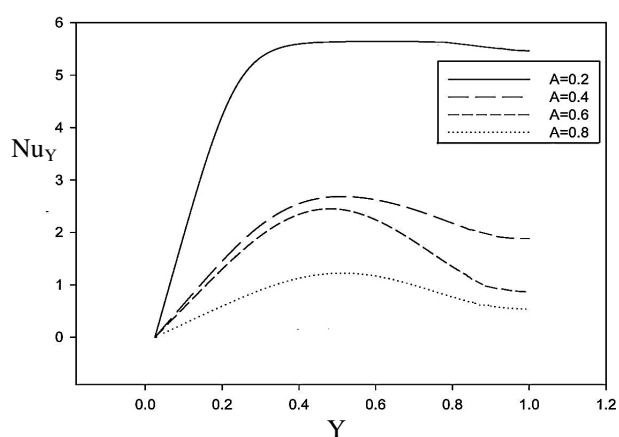
جدول ۴ عدد نوسلت متوسط روی دیواره‌های گرم و عدد نوسلت متوسط کل در زاویه‌های مختلف ($\phi = 0.03, A = 0.5$)

| θ | ۰ | ۴۵ | ۹۰ | ۱۳۵ | ۱۸۰ | ۲۲۵ | ۲۷۰ |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nu_{mx} | ۱/۴۱ | ۱/۴۶ | ۱/۵۳ | ۱/۵۵ | ۱/۴۱ | ۱/۴۶ | ۱/۴۴ |
| Nu_{my} | ۱/۵۳ | ۱/۴۶ | ۱/۴۱ | ۱/۳۸ | ۱/۵۳ | ۱/۴۶ | ۱/۵۳ |
| Nu | ۱/۴۷ | ۱/۴۶ | ۱/۴۷ | ۱/۴۷ | ۱/۴۷ | ۱/۴۶ | ۱/۴۷ |
| Nu_{mx} | ۱/۲۱ | ۱/۷۶ | ۱/۷۵ | ۱/۷۷ | ۱/۵۴ | ۱/۵۵ | ۱/۰۷ |
| Nu_{my} | ۲/۱۵ | ۱/۷۶ | ۱/۶۱ | ۱/۵۸ | ۱/۶۷ | ۱/۵۵ | ۲/۱۴ |
| Nu | ۱/۶۸ | ۱/۷۶ | ۱/۶۸ | ۱/۶۸ | ۱/۶۱ | ۱/۵۵ | ۱/۶۱ |
| Nu_{mx} | ۱/۹۴ | ۴/۰۶ | ۴/۶۶ | ۵/۳۴ | ۴/۴۸ | ۲/۰۸ | ۰/۶۸ |
| Nu_{my} | ۵/۶۰ | ۴/۰۶ | ۱/۹۱ | ۱/۲۲ | ۰/۶۹ | ۲/۰۸ | ۴/۴۶ |
| Nu | ۳/۷۷ | ۴/۰۶ | ۳/۲۹ | ۳/۲۸ | ۲/۵۸ | ۲/۰۸ | ۲/۵۷ |
| Nu_{mx} | ۳/۰۱ | ۶/۹۹ | ۸/۴۷ | ۹/۸۸ | ۸/۰۹ | ۲/۹۲ | ۱/۱۹ |
| Nu_{my} | ۸/۷۶ | ۶/۹۹ | ۳/۴۶ | ۲/۲۵ | ۱/۱۳ | ۲/۹۲ | ۷/۷۹ |
| Nu | ۵/۸۸ | ۶/۹۹ | ۵/۹۶ | ۶/۰۶ | ۴/۶۱ | ۲/۹۱ | ۴/۴۹ |

۷-۴- بررسی اثر نسبت ابعاد محفظه

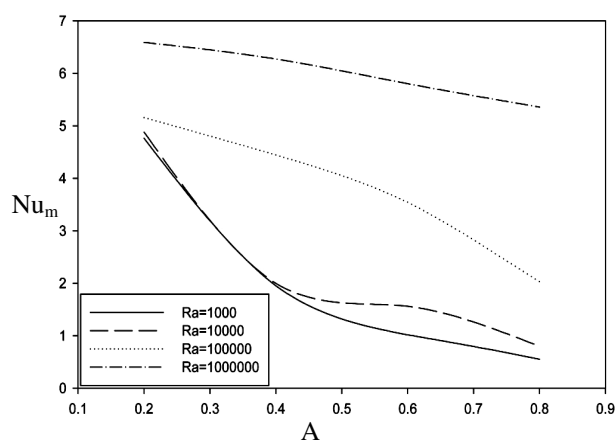
خطوط جریان و خطوط همدمای برای نسبت ابعاد محفظه $0.2 \leq A = W/L \leq 0.8$ با مقادیر $\theta = 45^\circ, \phi = 0.03$ به ازای $Ra = 10^4$ در شکل ۹ آمده است. همان‌طور که در این

برای مطالعه و بررسی بیشتر، منحنی تغییرات نوسلت موضعی روی دیواره گرم در امتداد محور Y ، در شرایط $Ra = 10^4$, $\phi = 0.03$, $\theta = 45^\circ$ در نسبت ابعاد مختلف در شکل ۱۰ آورده شده است. از مقایسه منحنی‌های این شکل نیز دیده می‌شود که با افزایش نسبت ابعاد محفظه نرخ انتقال حرارت موضعی دیواره گرم کاهش می‌یابد. شایان ذکر است در نسبت ابعادی $A = 0.2$ به دلیل نزدیکی زیاد منابع سرد و گرم مکانیزم هدایت کاملاً حاکم بوده و به همین دلیل در منحنی نوسلت موضعی آن بیشینه‌ای مانند حالت‌های دیگر دیده نمی‌شود.



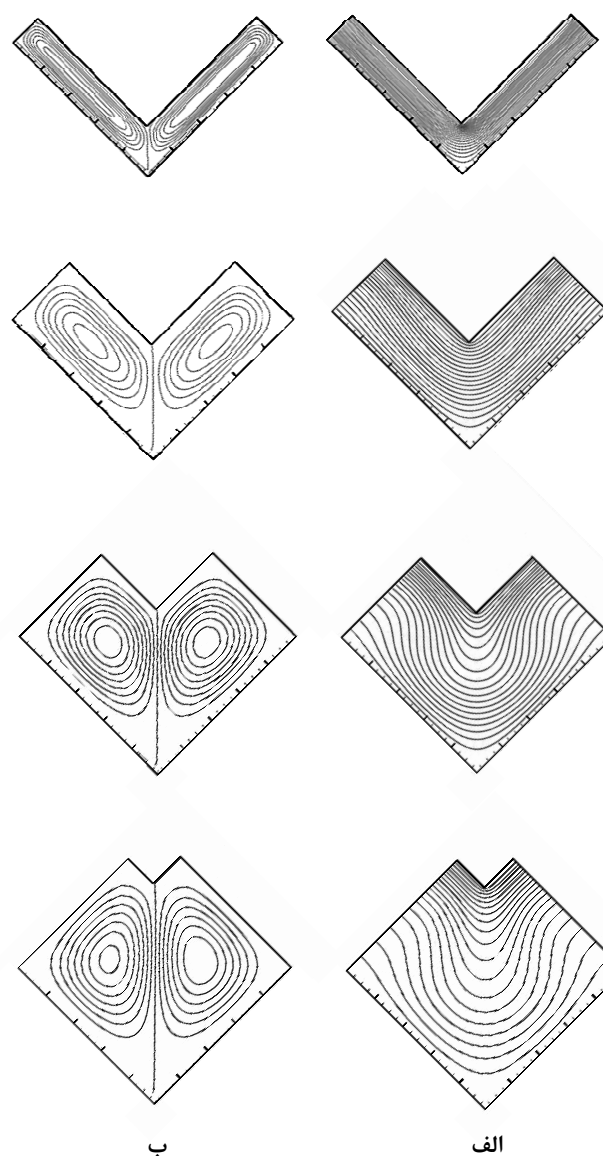
شکل ۱۰ تغییرات عدد نوسلت موضعی به ازای نسبت‌های ابعادی مختلف ($Ra = 10^4$, $\phi = 0.03$, $\theta = 45^\circ$)

به منظور مقایسه نرخ انتقال حرارت در نسبت ابعاد و اعداد ریلی مختلف، عدد نوسلت متوسط روی دیواره گرم در اعداد ریلی مختلف محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۱ رسم شده است.



شکل ۱۱ تغییرات عدد نوسلت متوسط با نسبت ابعادی محفظه در اعداد ریلی مختلف ($\phi = 0.03$, $\theta = 45^\circ$)

شکل مشاهده می‌شود، با توجه به هندسه و شرایط مرزی متقارن در کلیه نسبت ابعاد، خطوط جریان و همدمای متقارن است. گردابه‌های ساعتگرد و پاد ساعتگرد در همه حالات دو طرف محفظه را اشغال می‌کنند. با افزایش نسبت ابعاد اگر چه گردابه‌های چرخشی جریان تقویت می‌شوند لیکن، به دلیل کاهش طول دیواره‌های سرد و دور شدن آن از دیواره‌های گرم، انتظار می‌رود که نرخ انتقال حرارت کم شود. فاصله‌گرفتن خطوط همدمای و کاهش گرادیان‌های دما با افزایش نسبت ابعاد محفظه خود دلیلی بر این امر است.



شکل ۹ خطوط همدمای (الف) و جریان (ب) در نسبت ابعاد مختلف محفظه ($Ra = 10^4$, $\phi = 0.03$, $\theta = 45^\circ$)

همان‌طور که در مراجع [۱] و [۲] برای سیال خالص هوا گزارش شده است، در اینجا نیز با افزایش نسبت ابعادی محفظه عدد نوسلت متوسط محفظه کاهش می‌یابد. این کاهش در اعداد ریلی پایین که هدایت موثرتر است، بیشتر می‌باشد. همچنین، از این شکل دیده می‌شود که در کلیه ابعاد محفظه با افزایش عدد ریلی و تقویت نیروهای غوطه‌وری نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. البته در نسبت ابعادی کوچک، به دلیل نزدیک‌بودن دیواره‌های سرد و گرم، تغییر مکانیزم انتقال حرارت از هدایت به جابه‌جایی در اعداد ریلی بالاتر رخ می‌دهد. به همین دلیل، در نسبت ابعادی پایین، منحنی‌های مربوط به اعداد ریلی 10^3 و 10^4 تقریباً بر هم منطبق می‌باشند.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جریان جابه‌جایی آزاد در یک محفظه بسته L شکل به روش عددی تحلیل شد. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی حاکم به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده و توسط الگوریتم سیمپل به طور هم‌زمان حل شدند. اثر پارامترهای حاکم در جریان جابه‌جایی آزاد بر میزان انتقال حرارت بررسی شد. به طور کلی نتایج به‌دست آمده را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد.

۱- افزودن نانوذرات به آب خالص موجب افزایش انتقال حرارت آن شده و با بالارفتن درصد حجمی نانوذرات خواص حرارتی نانوسیال بهبود یافته و افزایش انتقال حرارت بیشتر می‌شود. برای محفظه L شکل مورد بررسی، این افزایش در اعداد ریلی پایین که مکانیزم هدایت حاکم است و در اعداد ریلی بالا که مکانیزم جابه‌جایی حاکم است، چشمگیر تر است.

۲- تغییر زاویه محفظه در اعداد ریلی بالا و پایین اثرات متفاوتی بر رفتار جریان دارد. در اعداد ریلی بالاتر اثر زاویه محفظه بر نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود، بیشترین نرخ انتقال حرارت در محفظه با زاویه 45° و کمترین نرخ انتقال حرارت در محفظه با زاویه 22.5° رخ می‌دهد.

۳- در کلیه اعداد ریلی با افزایش نسبت ابعادی محفظه، که با کاهش طول دیواره‌های سرد و افزایش فاصله آن‌ها از دیواره‌های گرم همراه است، نرخ انتقال حرارت از محفظه کاهش می‌یابد.

۹- علائم

علائم لاتین

| | |
|----|---|
| A | نسبت ابعادی محفظه، $A = W / L$ |
| g | شتاب جاذبه زمین، ms^{-2} |
| k | ضریب هدایت گرمایی، $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ |
| L | طول محفظه، طول مشخصه، m |
| p | فشار، Pa |
| T | دما، K |
| u | سرعت در جهت x، ms^{-1} |
| U | سرعت بی‌بعد در جهت x، $U = u / u_c$ |
| v | سرعت در جهت y، ms^{-1} |
| V | سرعت بی‌بعد در جهت y، $V = v / u_c$ |
| x | مختصه افقی، m |
| X | مختصه افقی بدون بعد، $X = x / L$ |
| y | مختصه عمودی، m |
| Y | مختصه عمودی بدون بعد، $Y = y / L$ |
| Nu | عدد نوسلت، $Nu = hL / k$ |
| Pr | عدد پرانتل، $Pr = \nu_f / \alpha_f$ |
| Ra | عدد ریلی، $Ra = g \beta_f L^3 (T_h - T_c) / \nu_f \alpha_f$ |
| W | ارتفاع محفظه، m |

علائم یونانی

| | |
|------------|---|
| α | ضریب پخش حرارتی، m^2s^{-1} |
| β | ضریب انبساط گرمایی |
| θ | زاویه محفظه با افق |
| θ^* | دمای بی‌بعد، $\theta^* = (T - T_c) / (T_h - T_c)$ |
| μ | لزجت دینامیکی، Pa.s |
| ν | لزجت سینماتیکی، m^2s^{-1} |
| ρ | دانشیته، kg.m^{-3} |
| φ | متغیر عمومی |
| ϕ | نسبت حجمی ذرات جامد |

زیرنویس‌ها

| | |
|---|-------------------|
| c | دیواره سرد (cold) |
| f | سیال خالص (fluid) |

- [8] B. Ghasemi, S. M. Aminossadati, "Brownian Motion of Nanoparticles in a Triangular Enclosure with Natural Convection", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 6, 2010, pp. 931-940
- [9] S. M. Aminossadati, B. Ghasemi, "Natural Convection Cooling of a Localized Heat Source at the bottom of a Nanofluid-Filled Enclosure", *Eur. J. Mech. B Fluids*, Vol. 28, 2009, pp. 630-640
- [10] G.A. Sheikhzadeh, A. Arefmanesh, M. H. KheirKhah, R. Abdollahi, "Natural Convection of Cu-Water Nanofluid in a Cavity with Partially Active Side Walls", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 30, 2011, pp. 166-176
- [11] M. Mahmoodi, "Numerical Simulation of Free Convection of a Nanofluid in L-Shaped Cavities", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, 2011, pp. 1731-1740
- [12] H. C. Brinkman, "The Viscosity of Concentrated Suspension and Solution", *J. Chem. Phys.*, Vol. 20, 1952, pp. 571-581.
- [13] J. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Second Ed., Oxford University Press, Cambridge, UK, 1904.
- [14] E. Abu-Nada, Z. Masoud, A. Hijazi, "Natural Convection Heat Transfer Enhancement in Horizontal Concentric Annuli using Nanofluids", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 5, 2008, pp. 657-665.
- [15] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor and Francis Group, New York, 1980, pp. 113-137.
- [16] H. F. Oztop, E. Abu-Nada, "Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nanofluid", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 29, 2008, pp. 1326-1336
- [17] Y. Varol., H. F. Oztop, A. Koca, "Entropy Production due to Free Convection in Partially Heated Isosceles Triangular Enclosures", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, pp. 1502-1513
- (hot) دیواره گرم h
(mean) متوسط m
(nanofluid) نانوسیال nf
(solid) نانوذرات s
- ۱۰- مراجع
- [1] D. Angirasa, R. L. Mahajan, "Natural Convection from L-Shaped Corners with Adiabatic and Cold Isothermal Horizontal Walls", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, 1993, pp. 149-157.
- [2] S. H. Tasnim, S. Mahmud, "Laminar Free Convection inside an Inclined L-Shaped Enclosure", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, 2006, pp. 936-942
- [3] Y. Xuan, Q. Li, "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 21, 2000, pp. 58-64.
- [4] D. S. Wen, Y. L. Ding, "Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at Entrance Area under Laminar Flow Region", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, 2004, pp. 5181-5188.
- [5] A. H. Mahmoudi, M. Shahi, A. Honarbaksh Raouf, A. Ghasemian, "Numerical Study of Natural Convection Cooling of Horizontal Source Mounted in Square Cavity Filled with Nanofluid", *International communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, 2010, pp. 1135-1141.
- [6] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, "Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 46, 2003, pp. 3639-3653.
- [7] M. Muthamilselvan, P. Kandaswamy, J. Lee, "Heat Transfer Enhancement of Copper-Water Nanofluid in a Lid-Driven Enclosure", *Communication in nonlinear science and numerical simulation*, Vol. 15, 2009, pp. 1501-1510